



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

POUŽITÍ PARNÍCH TURBÍN

THE USE OF STEAM TURBINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KISSLER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAN FIEDLER, DR.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Kissler

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Použití parních turbin

v anglickém jazyce:

The use of Steam Turbines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte rozšířenou rešerši použití parních turbin se zaměřením zejména na jaderné centrály.

Cíle bakalářské práce:

- Popis historie, rozdělení a vývoje parních turbin, popište specifické konstrukční znaky turbin v jaderných centrálách.
- technický popis konstrukční koncepce a zapojení v sekundárním okruhu parní turbíny v EDU.
- základní bilanční výpočty oběhu a turbíny.

Seznam odborné literatury:

Firemní podklady ŠKODA, Siemens, Alstom apod.

Fiedler, J.: Parní turbíny - návrh a výpočet, CERM- Brno 2004

Kadrnožka, J.: Tepelné turbíny a turbokompresory, CERM- Brno, 2007

Krbek, J. Polesný, B. Fiedler, J.: Strojní zařízení tepelných centrál, PC-DIR, 1999

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.10.2012



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je seznámení s vývojem parních turbín od jejich vzniku až po detailní popis jednoho z jejich významných zástupců mezi moderními turbínami.

V úvodní části je práce zaměřena na historický vývoj prvních turbín a jejich rozdělení podle základních hledisek. Následuje popis použití parních turbín pro výrobu elektřiny, pro pohon strojů a pro použití v teplárenství. V závěrečné části je podrobný popis turbíny nacházející se na Jaderné elektrárně Dukovany doplněný zjednodušeným výpočtem.

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to present the development of steam turbines from their construction to the detailed description of one of the major representatives of the modern turbines.

The introduction of my thesis focuses on the historical development of the first turbines and their division according to the basic aspects. It is followed by a description of the use of steam turbines to generate electricity, for driving machines and for use in heating plants. The conclusion of my thesis is a detailed description of the turbines located on Nuclear Power Plant. To the description is added a simplified calculation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Parní turbína, jaderná elektrárna, turbosoustrojí, nízkotlaký díl, vysokotlaký díl, výkon.

KEYWORDS

Steam turbine, nuclear power plant, turbine, low pressure part, high pressure part, performance.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KISSLER, M. Použití parních turbín. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl všechny použité zdroje a literaturu.

V Brně dne 11. května 2013

.....

Martin Kissler



PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr., za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 PARNÍ TURBÍNA	10
2 HISTORIE	11
2.1 GIOVANNI DE BRANCA	11
2.2 CARL GUSTAV DE LAVAL	11
2.3 CHARLES ALGERNON PARSONS	12
2.4 CH. G. CURTIS	14
3 ROZDĚLENÍ PARNÍCH TURBÍN	15
3.1 PODLE POČTU PRACOVNÍCH STUPŇŮ	15
3.2 PODLE VSTUPNÍHO TLAKU	15
3.3 PODLE VÝSTUPNÍHO TLAKU	15
3.4 PODLE SMĚRU PROUDĚNÍ PÁRY	16
3.5 PODLE OTÁČEK	17
3.6 PODLE POČTU TĚLES	17
3.7 PODLE POČTU HŘÍDELŮ	19
4 VYUŽITÍ PARNÍCH TURBÍN V ČR	20
4.1 PRO VÝROBU ELEKTŘINY	20
4.2 PRO TEPLÁRENSTVÍ	20
4.3 PRO MECHANICKÉ POUŽITÍ	21
5 PARNÍ TURBÍNY V JADERNÝCH CENTRÁLÁCH	22
6 TECHNICKÝ POPIS ZÁKLADNÍCH ČÁSTÍ PARNÍ TURBÍNY V EDU	24
6.1 VYSOKOTLAKÝ DÍL	25
6.2 NÍZKOTLAKÝ DÍL	26
6.3 LOŽISKA PARNÍ TURBÍNY	27
6.4 NATÁČECÍ ZAŘÍZENÍ TG	27
7 ROZDÍL TEPLOT SVRŠEK – SPODEK NA VT DÍLU	28
8 ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET VÝKONU PARNÍ TURBÍNY	29
ZÁVĚR	30
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	31
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	32

ÚVOD

V České republice se asi 60% elektrické energie vyrobí v tepelných elektrárnách. Jaderné elektrárny Dukovany a Temelín vyrobí přibližně 33% energie a zbývajících 7% je vyrobeno v elektrárnách vodních a pomocí dalších obnovitelných zdrojů. Z těchto čísel je jasné patrné, že při výrobě více než 90% elektrické energie byly využity parní turbíny jakožto jedna z nejzákladnějších zařízení tepelných a jaderných elektráren. Parní turbíny se nepoužívají jen ve velkých elektrárnách s vysokými výkony, ale mnohem častěji se můžeme setkat s turbínami o středních a nižších výkonech. Tyto turbíny mají široké uplatnění v teplárnách, spalovnách a dalších odvětvích průmyslu.

V současné společnosti dochází k neustálému růstu spotřeby elektrické energie. Podle pesimistických scénářů má v České republice do roku 2050 spotřeba elektrické energie vzrůst až o 25% oproti roku 2010. Následuje otázka, jakým způsobem bude ukojena rostoucí poptávka po energiích, jestli to bude z klasických zdrojů, anebo z moderních obnovitelných zdrojů elektrické energie. Touto a mnoha dalšími otázkami se zabývá průmyslové odvětví energetika. Je důležité také říci, že energetika je jeden z nejširších oborů v české ekonomice, ale také jeden z nejkonzervativnějších. Chod společnosti je závislý na pravidelných dodávkách elektrické energie, a proto je spolehlivost všech zařízení, které se podílejí na výrobě a přenosu elektrické energie, na prvním místě.

V České republice jsou turbíny ve velké míře nejen využívány, ale české země rovněž patřily k výrobcům parních turbín už v období před první světovou válkou. V současnosti se z mnoha českých podniků vyvážejí turbíny do celého světa. Právě tato historie dává podnikům jako je Doosan Škoda Power, Siemens Industrial Turbomachinery, Alstom a dalším výhodu, díky které se drží na světové úrovni. Současné trendy výroby turbín jsou takové, že každá turbína je originál a je pro svého zákazníka tzv. šitá na míru.

1 PARNÍ TURBÍNA

Parní turbína je rotační tepelný stroj, který získává mechanickou energii pomocí expanze proudící vodní páry v jednotlivých stupních turbíny, které se dělí na NT a VT díly. [1]

Parní turbína je využívána především v průmyslu pro pohon generátorů na výrobu elektrické energie nebo pro pohon kompresorů a čerpadel.

Základní části turbíny jsou rotor s oběžnými lopatkami a skříň s rozváděcími lopatkami.

Pohánění parní turbíny je zajištěno na základě kontinuální změny tepelné a tlakové energie (entalpie) na kinetickou energii proudící páry. Silovým působením páry (změna hybnosti pracovní látky) na profily rotorových lopatek vzniká kroutící moment na rotoru stroje.



Obr. 1 Rotor moderní parní turbíny[7]

2 HISTORIE

Konstruktéři se neustále snažili sestavit parní stroj, který by dosahoval lepších provozních výsledků v poměru mezi spotřebovaným palivem a získanou energií. Navzdory všem snahám a nejnovějším konstrukčním řešením se nedařilo získat více než 10% energie obsažené v palivu. Parní stroj přes všechny úpravy, zlepšení a úsporná zařízení nedosahoval lepší účinnosti. Jedinou možností, jak dosáhnout větší účinnosti, bylo zbavit se značné přítěže komplikovaných součástí, proto musel být parní stroj nahrazen metodou novou, která by lépe využila parní energii.

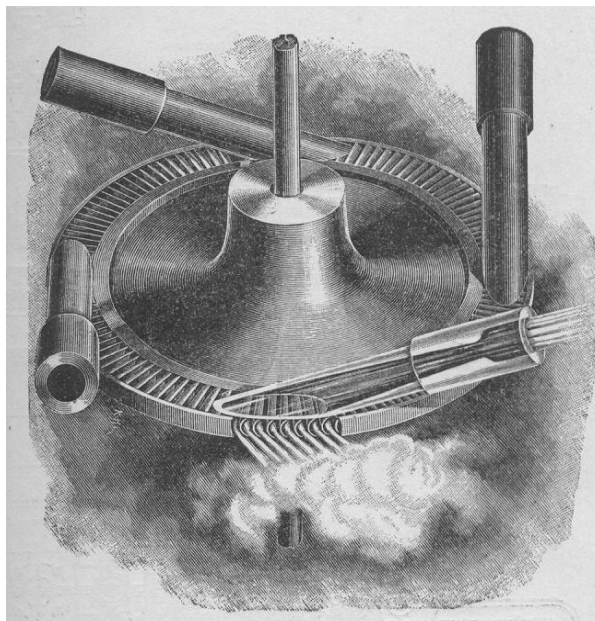
Až v 19. století se konstruktérům podařilo přijít s novým řešením, když Švéd de Laval a Angličan Parson vynalezli a následně sestrojili parní rotační stroj, kterému díky jeho podobě s vodní turbínou začali říkat parní turbína. Podobný nápad měl již v 17. století Giovanni de Branca, jeho turbína se tehdy bohužel neujala. Jedním z hlavních důvodů pro vznik moderní parní turbíny byla snaha o dosažení vysokého množství otáček. Tomuto požadavku nemohl vyhovět žádný parní stroj. Vždy bylo potřeba různých převodových členů, kterými se sice dosáhlo žádoucích otáček, ale se značnou ztrátou na síle. Parní turbína těmto požadavkům vyhověla, dosahovala až 30.000 otáček za minutu, takže naopak musela být provedena opatření, která počet otáček redukovala. [8]

2.1 Giovanni de Branca

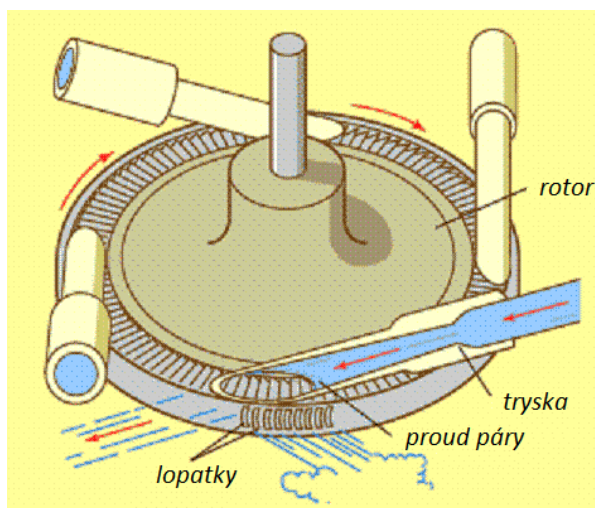
Giovanni de Branca zavedl roku 1629 proud páry na lopatkové kolo, objevil tak princip akční turbíny. Brancova turbína se sice účinkem páry otáčela, ale neposkytovala tolik síly, aby mohla pohánět stroje, a prakticky se neujala. I přesto byl Brancův vynález v roce 1629 nadčasový.

2.2 Carl Gustav de Laval

Carl Gustav de Laval sestrojil svoji parní turbínu roku 1883 podle vzoru Peltonovy vodní turbíny s tím, že místo dvojitých lopatek byly použity lopatky jednoduché. U Lavalovy parní turbíny nepůsobí pára na lopatky tlakem, ale pouze živou silou neboli rychlostí. Tímto způsobem se využije většina energie páry téměř bez ztrát. Pára působí přímo na turbínu, čímž se zamezí úniku tepla, ke kterému docházelo u parních strojů. Výhody, které tato turbína poskytovala, byly značné - úspora páry, možnost postrádání ucpávek, klikového ústrojí, složitého rozvodu a nákladných základů. Zjednodušena byla i obsluha a údržba. A také prostor parní turbíny je výrazně menší než u parních strojů. Oběžná kola turbíny dosahovala až 26 000 ot/min. [8]



Obr. 2 De Lavalova parní turbína[8]

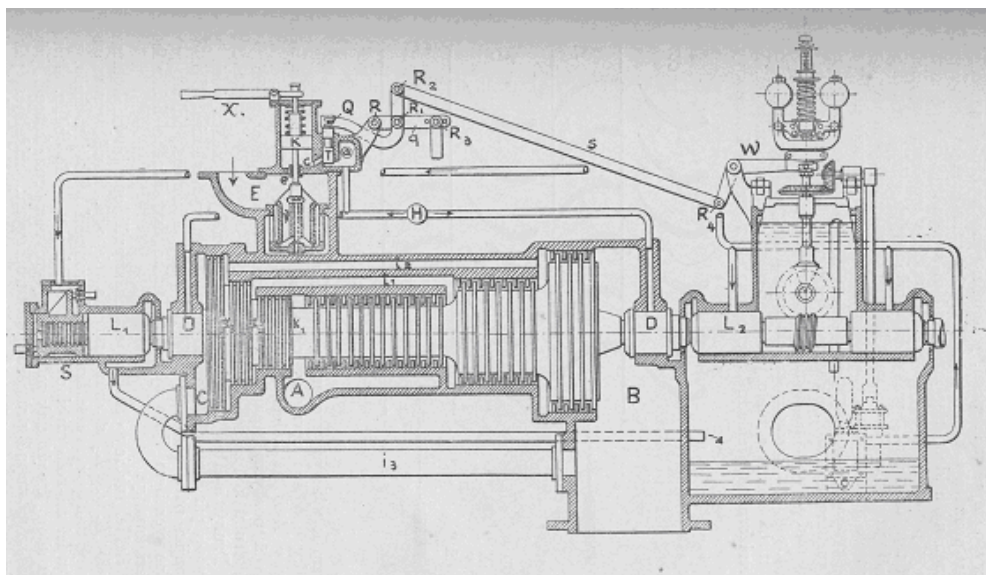


Obr. 3 De Lavalova parní turbína[7]

2.3 Charles Algernon Parsons

V roce 1884 představil Angličan Parson úspěšně svou parní turbínu. Turbína se skládala ze dvou skupin za sebou řazených otočných kol. Pára vstupovala ze středu a celkový spád se rozdělil na všechna oběžná kola. Parsonova turbína měla nižší otáčky než de Lavalova turbína, ale byla schopna dosahovat větších výkonů. [8]

Přehledné grafické znázornění Parsonovy turbíny v řezu je zachyceno na obr. 4. Z obrázku je patrné, že tato turbína se svojí koncepcí podobá moderním turbínám, na rozdíl od turbíny de Lavalovy.

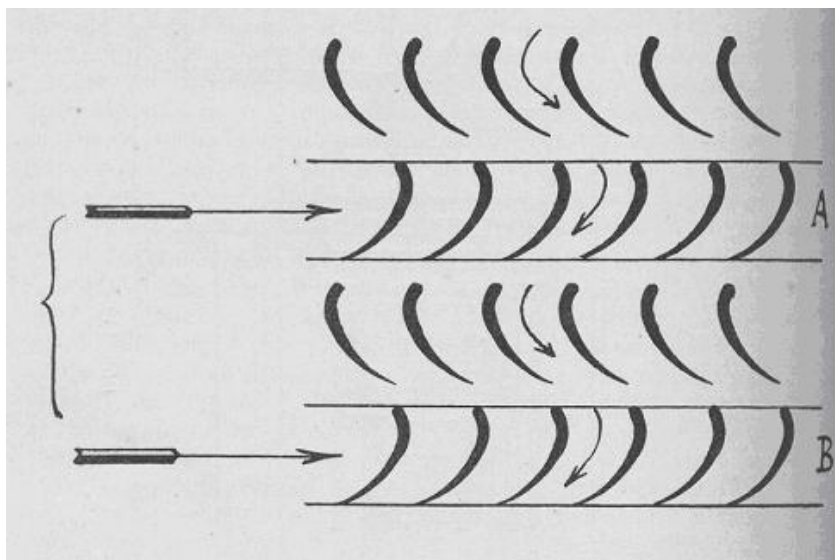


Obr. 4 Řez Parsonovou parní turbínou [8]



Obr. 5 Parsonova parní turbína v Technickém muzeu v Brně

Turbína má dvojí druh lopatek, a to lopatky pevné a otáčející se. Přehledné znázornění směru lopatek znázorňuje obr. 6. Otáčející se lopatky jsou na kole A a B. Zbylé lopatky jsou rozváděcí, které usměrňují tok páry na lopatky otáčejících se kol. Tohoto principu se využívá i u moderních turbín, neboť umožňuje nasměrovat páru potřebným směrem, a tím ji efektivněji využít.



Obr. 6 Řez lopatkami Parsonovi parní turbíny [8]

Švéd de Laval tedy u své turbíny využil princip **rovnotlaké turbíny**, u které tlak v oběžném kole zůstává stejný, ale rychlost páry klesá. Rozdíl mechanické energie se mění v mechanickou práci. [6]

Princip přetlakové akční turbíny, která má rozdílný tlak před a za oběžným kolem využil pan Parsons.

2.4 Ch. G. Curtis

Američan Curtis si nechal patentovat princip turbíny, ve kterém využil více řad akčních lopatek pro zpracování velkého entalpického spádu. U jeho turbíny se v prvním statorovém rozváděcím kole transformuje tepelná a tlaková energie na kinetickou. Změna hybnosti páry probíhá v několika dalších stupních při konstantním tlaku. [6]

Další vývoj směřoval k tomu, že se sdružovalo více oběžných kol na jediný společný rotor, což znamenalo přechod k vícestupňové expanzi páry.

3 Rozdělení parních turbín

Zařazení parních turbín do jednotlivých skupin tak, aby skupina každou turbínu přesně charakterizovala, je prakticky nemožné. Vzhledem k tomu, že turbíny se používají v různých odvětvích průmyslu, musí mít každá turbína svá specifika, aby se přesně hodila na daný úkol, pro který byla zkonstruována. [5]

Nejzákladnější rozdělení parních turbín může být například takovéto:

3.1 Podle počtu pracovních stupňů

a) Jednostupňová parní turbína

Je v ní obsažen jeden pracovní stupeň, který zpracovává celý tepelný spád. Tato turbína je obvykle vysokootáčková.

b) Vícestupňová parní turbína

Je složena z více pracovních stupňů a každý z nich zpracovává pouze část tepelného spádu. Absolutní rychlost v jednotlivých stupních je relativně nízká a turbíny jsou nízkootáčkové. Výhodou proti jednostupňové turbíně je, že dokáže lépe využít celkovou energii.

3.2 Podle vstupního tlaku

a) Nízkotlaká parní turbína do tlaku 2,45MPa,

b) Středotlaká parní turbína do tlaku 5MPa,

c) Vysokotlaká parní turbína od tlaku 5MPa.

3.3 Podle výstupního tlaku

a) Kondenzační parní turbína

Pára vystupuje z turbíny do kondenzátoru, kde je nízký tlak. V kondenzátoru pára kondenzuje a kondenzát je čerpán směrem k parogenerátoru.

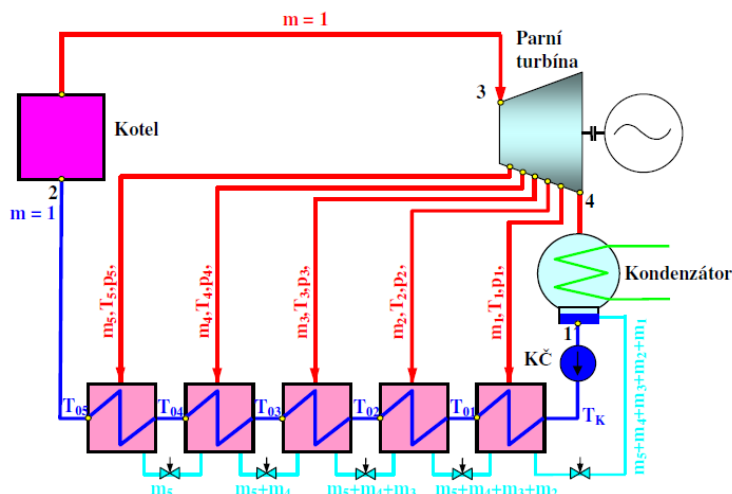
b) Protitlaká parní turbína

Pára vystupuje z turbíny při tlaku vyšším než je tlak atmosférický a používá se dál pro technologické nebo teplárenské účely.

c) Odběrová parní turbína

U některých turbín se pára odebírá dříve než za posledním stupněm. Z turbíny se odebírá jen částečně zpracovaná pára, která se využívá v technologických zařízeních nebo k regeneraci a tím zvýšení účinnosti pracovního cyklu.

Tyto turbíny mohou být jak kondenzační, tak i protitlaké a nazývají se turbíny odběrové.

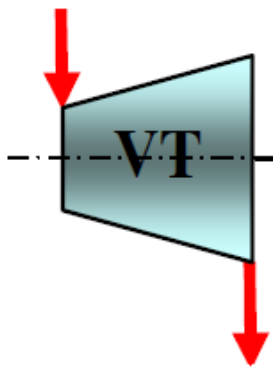


Obr. 7 Schéma regenerace s pěti ohříváky [5]

3.4 Podle směru proudění páry

a) Jednoprúdová parní turbína

Pára vstupuje do turbíny z jedné strany a po průtoku pracovními stupni vystupuje na opačném konci. Síla působící páry na oběžné lopatky vyvolává axiální sílu, která je zachycována axiálními ložisky. Se vzrůstající silou se zvyšuje tření v ložisku a tím i ztráty.



Obr. 8 Jednoprúdová parní turbína [5]

b) Dvouproudá parní turbína

Pára vstupuje do středu turbíny a proudí pracovními stupni k oběma koncům turbíny. Síly působící na oběžné lopatky se vzájemně ruší a díky tomu vznikají jen malé axiální síly.

3.5 Podle otáček

a) 3000 ot/min (3600 ot/min)

b) 1500 ot/min (1800 ot/min)

Protože v elektrické síti je frekvence 50 Hz, je u většiny turbín sloužících k výrobě elektrické energie rychlost 3000 ot/min. Když má turbína sloužící pro výrobu elektřiny 1500 ot/min, tak je v cílce generátoru použito dvojité vinutí, čímž se dostaneme opět na frekvenci 50 Hz. V USA je v elektrické síti jiná frekvence než 50 Hz, čehož se docílí změnou otáček rotoru v generátoru, který je přímo spojen s parní turbínou, a tak se dostaneme na 3600 ot/min (1800 ot/min).

c) Vysokootáčkové

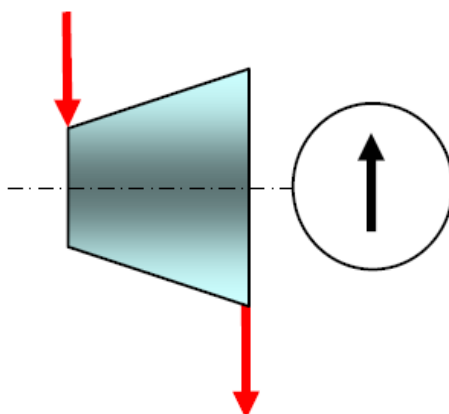
Je nutné je regulovat převodovkou.

3.6 Podle počtu těles

a) Jednotělesová parní turbína

Jednotělesová parní turbína nemá takovou účinnost jako turbína vícetělesová, a proto se používá jen pro malé výkony.

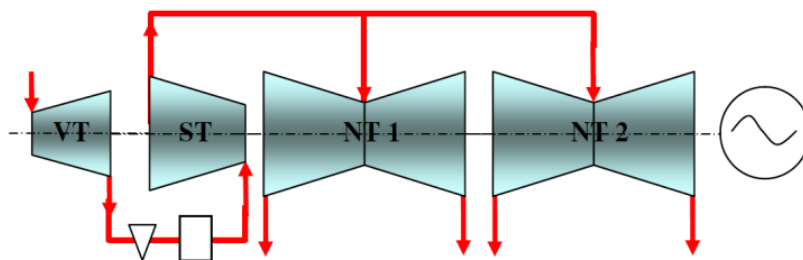
Používá se například pro pohon čerpadel a podobných zařízení.



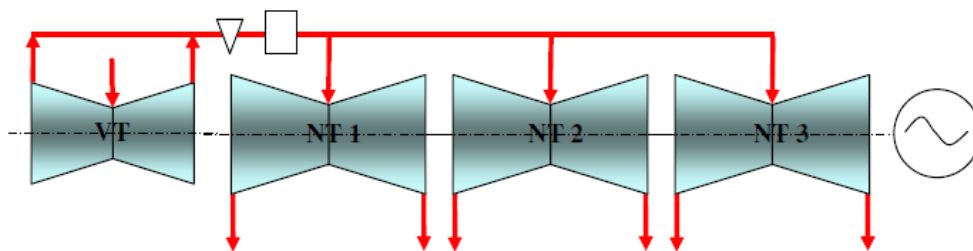
Obr. 9 Jednotělesová určená pro pohon čerpadla [5]

b) Vícetělesová:

- dvoutělesová (1 VT díl + 1 NT díl),
- třítělesová (1 VT díl + 1 ST díl + 1 NT díl),
(1 VT díl + 2 NT díly),
- čtyřtělesová (1 VT díl + 1 ST díl + 2 NT díly),
(1 VT díl + 3 NT díly).



Obr. 10 Čtyřtělesová parní turbína (VT+ST+NT 1+NT 2) [5]



Obr. 11 Čtyřtělesová parní turbína (VT+NT 1+NT 2+NT 3) [5]

3.7 Podle počtu hřídelů

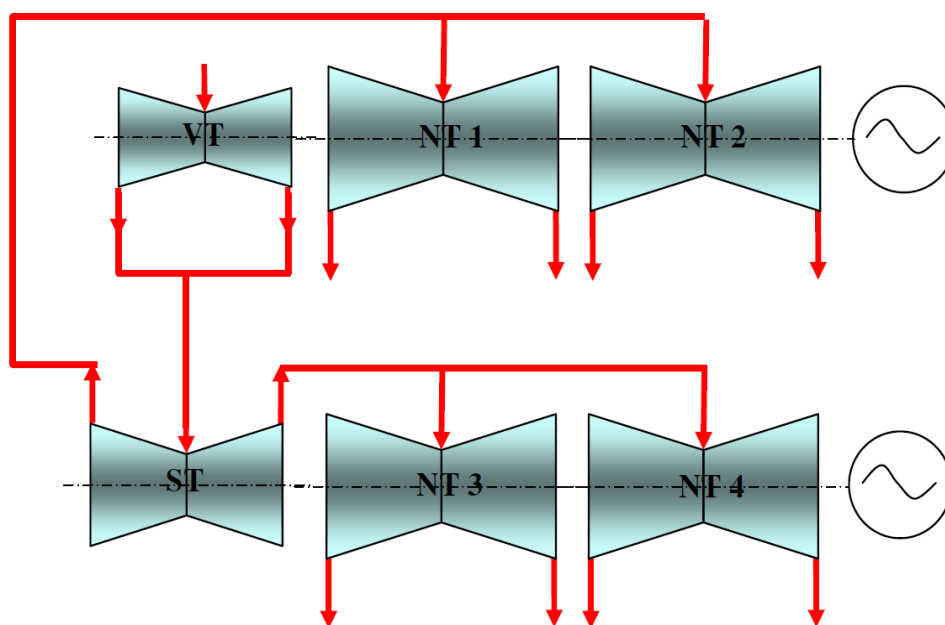
a) Jednohřídelová parní turbína:

Všechny díly parní turbíny leží na společném hřídeli a společně pohání jeden generátor.

b) Vícehřídelová parní turbína:

Jednotlivé díly parní turbíny jsou rozloženy na dva a více hřídelů. Každý hřídel pohání vlastní generátor.

Toto uspořádání se používá pro velké výkony nad 800 MW, ale v současnosti se již moc nevyužívá. Hlavní výhody vícehřídelové turbíny plynou z možnosti nahrazení některých částí s velkými rozměry za větší počet menších částí. Například u generátorů to do značné míry usnadňovalo jejich přepravu.



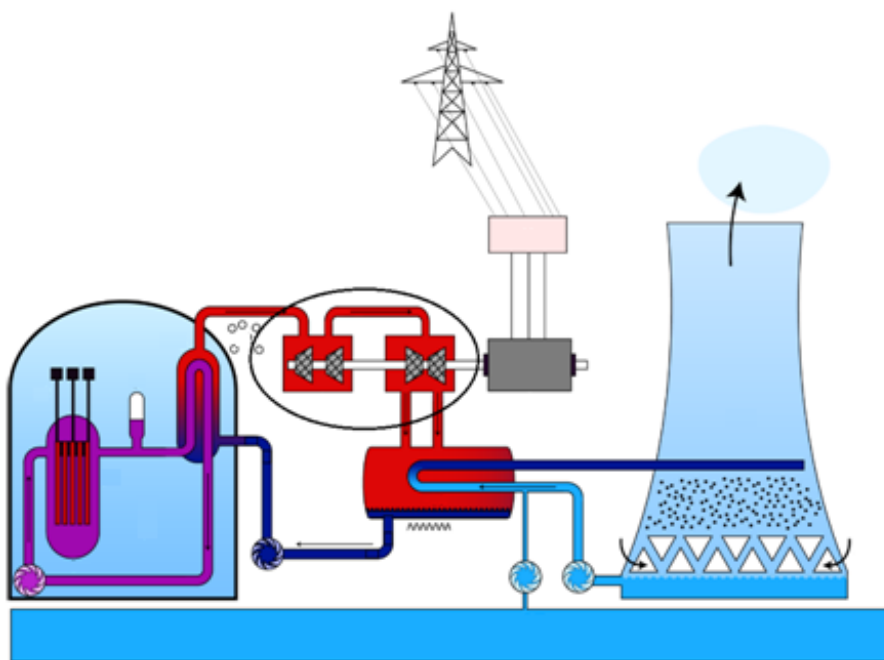
Obr. 12 Dvouhřídelová parní turbína [5]

4 Využití parních turbín v ČR

4.1 Pro výrobu elektřiny

Většina parních turbín je využívána pro výrobu elektřiny, tudíž tyto turbíny pohánějí generátor.

V ČR jsou nejvýznamnější elektrárny které, využívají parní turbíny pro pohon generátoru, jaderné (Jaderná elektrárna Temelín a Jaderná elektrárna Dukovany) a také elektrárny uhelné (Tušimice II, Počerady, Pruněřov II, Chvaletice, Dětmárovice, Mělník II, Pruněřov I, Ledvice, Tisová, Mělník III). Za zmínku stojí i paroplynové elektrárny, které využívají jak parní tak i plynovou turbínu. Výstavba paroplynových elektráren v ČR je ve fázi příprav, největším problémem zůstává palivo plyn, který se po plynové krizi ze začátku roku 2009 stal značně nejistou surovinou. Speciálním případem je brněnský Červený mlýn, který je kombinací elektrárny a teplárny, a k výrobě elektřiny využívá paroplynového cyklu. [10]

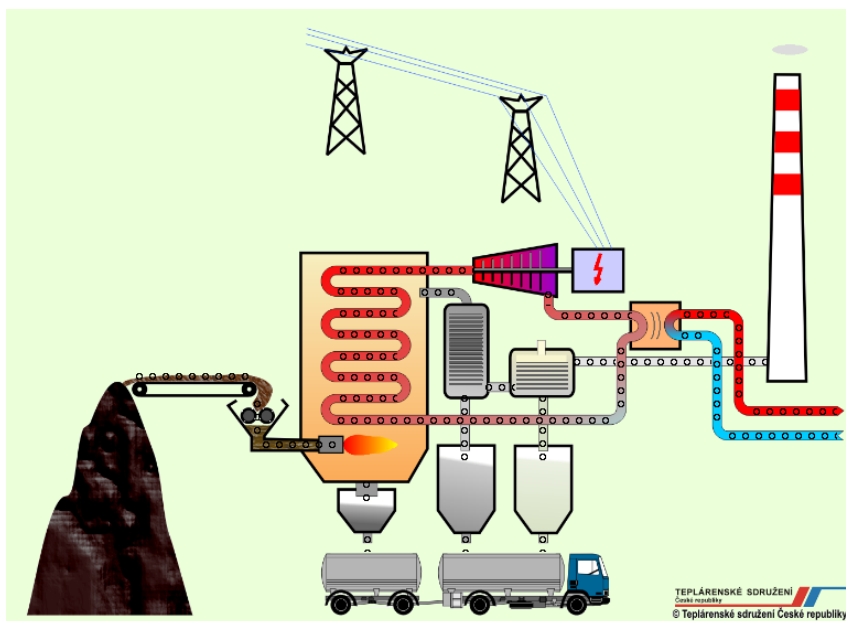


Obr. 13 Schéma jaderné elektrárny [12]

4.2 Pro teplárenství

Parní turbíny jsou také v hojném množství využívány v teplárenství, kde ve spojení s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla je dosahováno výrazně vyšší účinnosti využití primárního paliva oproti oddělené výrobě elektřiny v kondenzační elektrárně a tepla ve výtopně.

V těchto zařízeních tzv. teplárnách je využíváno mnoho principů přeměny energie. Při kombinované výrobě elektřiny a tepla je využíváno: protitlaké parní turbíny, odběrové parní turbíny a paroplynového cyklu. [11]



Obr. 14 Kombinovaná výroba elektřiny a tepla v uhelné teplárně [11]

4.3 Pro mechanické použití

Další možností využití turbín než k výrobě elektřiny jsou například turbíny pro pohon čerpadel, kompresorů a turbokompresorů. Ve světě jsou turbíny používány i jako lodní pohony.

Takovéto turbíny jsou například na Jaderné elektrárně Temelín, kde na každém výrobním bloku jsou tři. Jejich úkolem je pohánět čerpadlo, které čerpá vodu z napájecích nádrží do parogenerátorů.

V chemickém a hutním průmyslu se využívají turbíny pro pohon turbokompresorů. Například při průmyslové výrobě amoniaku se využívá kompresor pro stlačení vodíku a dusíku. Tyto kompresory jsou poháněny parní turbínou, protože elektromotory nedosahují takovýchto výkonů.

První turbínou pohaněnou lodí byla parolod' Turbinia, která se okamžitě zařadila mezi nejrychlejší lodě své doby. Na Turbinii byla instalována Parsonova turbína v roce 1894, doplněná redukční převodovkou k pohonu pomaloběžného hřídele lodní vrtule. Parní turbíny byly poté instalovány do lodí Královského námořnictva a později i do civilních lodí, kde se využívají i v současnosti.

5 Parní turbíny v jaderných centrálách

Při konstrukci parních turbín, které využívají páru vyrobenou v tlakovodních reaktorech, se musí uvažovat se skutečností, že v sekundárním okruhu jaderných elektráren je dosahováno výrazně nižších parametrů páry než v klasických elektrárnách na fosilní paliva. Jako následek skutečnosti, že pára má nižší teplotu a tlak, musí turbína zpracovat mnohem vyšší objemové množství páry k tomu, aby dosáhla stejného výkonu. [5]

Jako názorný příklad si můžeme uvést, že turbína 220 MW na přehřátou páru má hltlost 630 t.h^{-1} a turbína 220 MW na sytou páru má hltlost 1340 t.h^{-1} . Tato skutečnost vede k vysokým nárokům na konstrukci rozměrných nízkotlakých dílů.

Základní faktory, které ovlivňují konstrukční koncepce parních turbín pro JE, jsou:

a) Typ reaktoru:

Celosvětově jsou nejvíce rozšířeny tlakovodní reaktory, které jsou schopny dodávat pouze sytou páru.

Parní turbína v klasické elektrárně a parní turbína u tlakovodního reaktoru o stejném svorkovém výkonu se od sebe liší například:

- parametry vstupující páry
- velikostí hmotnostního průtoku páry turbínou
- průběhem expanze páry v turbíně
- množstvím chladicí vody protékající kondenzátorem

typ reaktoru	stav vstupující páry		teplota NV
	tlak [MPa]	teplota [°C]	[°C]
tlakovodní (VVER)	4 – 6	259 - 279	164 - 223
varný (BWR)	6,5 – 7	285 - 295	210 - 220
vysokoteplotní (HTGR)	19,0 – 5,0	535	180

Obr. 15 Parametry vstupující páry u různých typů reaktorů [5]

b) Lokalita elektrárny

Místo, kde se elektrárna nachází, má na parametry turbíny největší vliv prostřednictvím velikosti vodního zdroje. Z tohoto zdroje je zásobován chladicí okruh pro chlazení kondenzátoru. Velký vliv má také teplota této chladicí vody.

c) Svorkový výkon

Svorkový výkon a tlak páry v kondenzátoru určují zásadním způsobem velikost turbíny. Se zvětšujícím se svorkovým výkonem a snižujícím se tlakem v kondenzátoru se musí zvětšovat parní turbína. Limitující částí je délka oběžné lopatky posledního stupně NT dílu parní turbíny.

d) Předpokládaný provozní režim

Provozní režim parní turbíny má největší vliv především na regulaci. Pro parní turbínu je možné použít regulaci škrcením nebo dýzovou regulaci.

U parních turbín, které jsou určeny pro nepřetržitý provoz, je výhodnější použít regulaci škrcením. Tato regulace je jednoduchá a má v pracovním bodě vysokou účinnost.

U parních turbín, které jsou především využívány pro regulaci soustavy, je využívána dýzová regulace. Tyto turbíny pracují při výkonu, který se mění v určitém rozsahu při špičkovém nebo pološpičkovém režimu. [5]

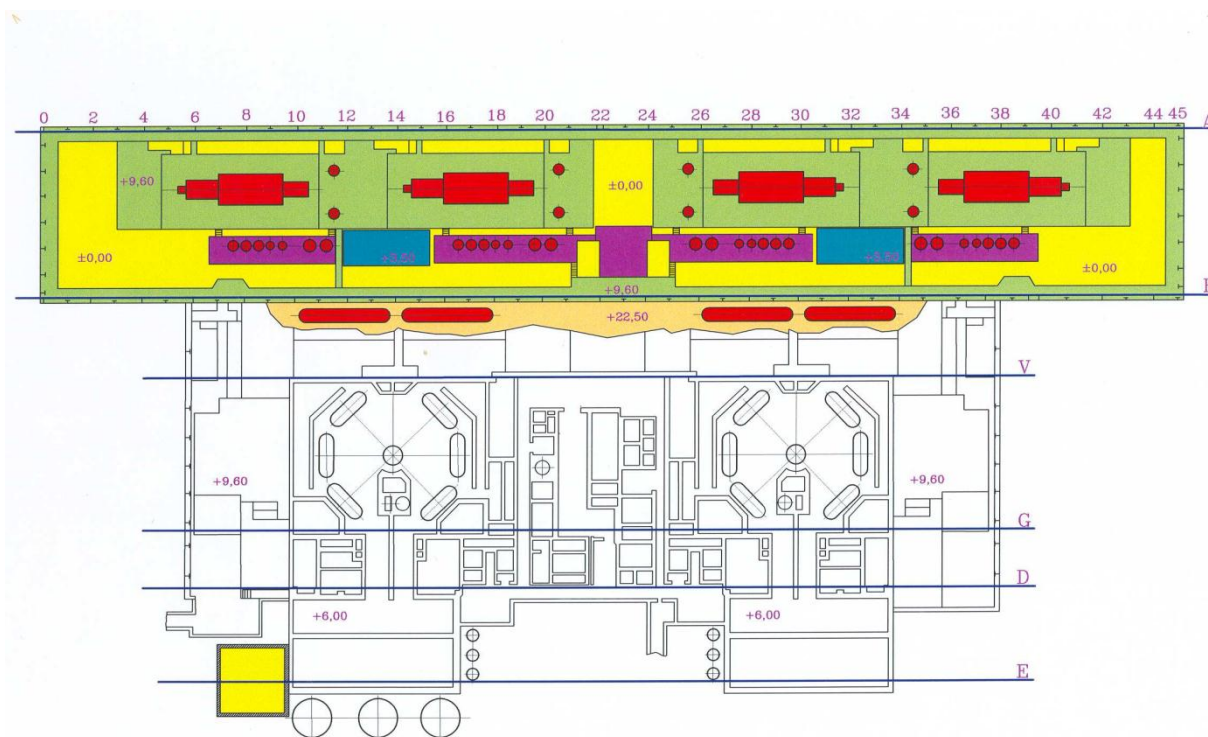
6 Technický popis základních částí parní turbíny v EDU

Jaderná elektrárna Dukovany je nejstarší jadernou elektrárnou na území České republiky a patří k nejspolehlivěji provozovaným elektrárnám na světě. Elektrárna je rozdělena do tzv. bloků, kde každý blok se skládá z jednoho jaderného reaktoru a dvou turbosoustrojí.

V Jaderné elektrárně Dukovany jsou použity dvě stejné turbíny pro jeden reaktor a to třítělesové složené z jednoho VT dílu a dvou stejných NT dílů. V elektrárně je tedy 8 stejných parních turbín, které společně s dalšími částmi primárního a sekundárního okruhu prošly v letech 2009 – 2012 postupnou modernizací.

Parní turbína, dříve označovaná jako Škoda K 220-44, s výkonem 220 MW byla postupně nahrazena turbínou o výkonu 250 MW. Úkolem turbíny je přeměňovat tepelnou energii, která se získává během štěpení jaderného paliva, na energii mechanickou. Tato tepelná energie je z reaktoru k parní turbíně přenášena prostřednictvím syté páry. Turbína je spojena s turboalternátorem, který přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou.

Tělesa turbín jsou dělena vodorovnou rovinou a obě vzniklé poloviny jsou spojeny šrouby, které procházejí vodorovnými přírubami. Všechna tělesa jsou symetrická ke svislé i podélné ose. Pro usnadnění rovnoměrného prohřívání jsou tělesa parní turbíny provedena jednoduchými tvary. [13]



Obr. 16 Dispoziční uspořádání 1. a 2. bloku EDU [13]

6.1 Vysokotlaký díl

Vysokotlaké těleso je dvouproudé a v každém proudě má 6 pracovních stupňů. Pára do turbíny vstupuje čtyřmi hrdly, která navazují na rozváděcí kola prvního stupně. Rozváděcí kola jednotlivých stupňů jsou vzájemně sešroubována, čím se zabrání prošlehávání a zvýší se těsnicí tlak. VT díl je opatřen labyrintovými ucpávkami, které zabráňují zkratovému proudění páry štěrbinou mezi kruhy rozváděcích kol a rotorem. [13]



Obr. 17 Vysokotlaký díl [13]

Z každého proudy VT tělesa je odváděna pára pro neregulované odběry.

Odběry jsou za:

- oběžným kolem 1. stupně
- oběžným kolem 2. stupně
- oběžným kolem 4. stupně

VT těleso je symetrické v podélné i svislé ose. Je dělené vodorovnou rovinou. Obě poloviny jsou spojeny šrouby procházejícími vodorovnými přírubami. Jednoduché tvary VT usnadňují rovnoměrné prohřívání při najíždění.

VT rotor se skládá z hřídele, na kterém jsou umístěny oběžné lopatky. Na hřídeli, který je celokovaný s patním průměrem 1050 mm, je ve střední části vykováno třináct disků. Prostřední disk je umístěn v rovině souměrnosti a po obou stranách tohoto disku šest a šest disků, které tvoří základ oběžných kol.

Oběžné lopatky prvních pěti stupňů jsou ke hřídeli připevněny ozubenými T nožkami, pouze u posledního 6. stupně je použit vidličkový závěs.

6.2 Nízkotlaký díl

Nízkotlaké díly musí po vyčerpání životnosti 100 000 pracovních hodin, které byly po provedení kontroly výrobcem Škoda Power prodlouženy na 130 000 hodin, projít rozsáhlou rekonstrukcí. Při této rekonstrukci došlo k výměně průtočných částí. Tato rekonstrukce byla ukončena v roce 2008, kdy byl vyměněn poslední NT díl na 2. bloku jaderné elektrárny.

NT těleso je stejně jako VT těleso dvouproudé a v každém proudu je 5 pracovních stupňů. Odběry páry jsou u NT těles provedeny symetricky na obou proudech. Symetrické provedení je z důvodu nutnosti snížení axiální síly v rotoru.

Na NT těleso navazují deflektory, ve kterých pára po výstupu z pracovního prostoru expanduje.

Nízkotlaký rotor je složen z hřídele a oběžných lopatek. Při rekonstrukci NT tělesa byl původní skládaný rotor nahrazen rotorem celokovaným a došlo také ke snížení celkové hmotnosti.

Oběžné lopatky prvních 4 stupňů jsou v rotoru uchyceny pomocí vidličkových nožek a pouze poslední stupně mají obloukovou stromečkovou nožku.

Během výměny oběžných kol musela být zachována délka lopatky posledního stupně 840 mm. To byla ale jediná hodnota, která zůstala zachována, protože z původních 80 lopatek došlo ke snížení na současných 45. Nové lopatky ale také naznačily značných změn co se týče rozměrů a hmotnosti, kde z původních 9,4 kg má nyní jedna lopatka 42,4 kg. [13]



Obr. 18 Nový nízkotlaký rotor



Obr. 19 Původní nízkotlaký rotor [13]

6.3 Ložiska parní turbíny

Rotor parní turbíny je uložen celkově v 6 ložiscích, z nichž je 5 radiálních a jedno kombinované radiálněaxiální. Všechna ložiska jsou kluzná.

Axiální síly VT a NT rotoru jsou zachyceny v jednom dvoustranném axiálním kluzném ložisku, které je součástí kombinovaného radiálně axiálního ložiska. Toto ložisko je umístěno v ložiskovém stojanu mezi VT a NT tělesem.

Radiální ložisko u VT dílu má stejnou konstrukci jako radiální ložiska u NT dílů parní turbíny, liší se pouze rozdílnou velikostí. [13]

6.4 Natáčecí zařízení TG

Natáčecí zařízení se nachází mezi oběma NT díly a slouží k otáčení rotoru TG na cca 72 ot/min. Otáčení se provádí z těchto důvodů:

- a) při najiždění turbíny před spuštěním páry,
- b) při odstavení turbosoustrojí.

Protáčením je zajištěno rovnoměrné chlazení nebo prohřívání rotorů parní turbíny. [13]

7 Rozdíl teplot svršek – spodek na VT dílu

Po rekonstrukci sekundárního okruhu se u VT dílů parní turbíny objevil problém s nerovnoměrným vychlazováním horního a spodního tělesa VT dílu u obou TG.

Tento jev byl pozorován při zkoušce zregulování bloku ze 100% na vlastní spotřebu. Při tomto stavu dochází k odpojení generátoru od sítě a dále už se vyrábí jen elektřina pro zajištění vlastní spotřeby elektrárny.

Následkem rychlého přechodu TG z vysoké na nízkou výkonovou hladinu (8 až 20 MW) došlo k nerovnoměrnému vychlazování mezi horním a spodním tělesem VT dílů. Během této zkoušky byl rozdíl větší než 50°C, což vyvolává přechodnou deformaci VT tělesa a může vést k dotyku rotoru s labyrinty mezistupňových ucpávek. Tento stav vede dle technických podmínek pro TG k povinnosti obsluhy odstavit TG. Důsledkem odstavení TG v režimech zregulování bloku na vlastní spotřebu je neplnění požadavku Kodexu přenosové soustavy a zhoršení bezpečnosti EDU dle ukazatele CDF (pravděpodobnost tavení paliva reaktoru).

Řešení přineslo doplnění nového regulačního obvodu R17 (Regulace tlaku za VT dílem TG). Tento regulační obvod je zapnut při zregulování na vlastní spotřebu a má za úkol přivřít ventily na vstupu do NT dílů tak, aby došlo ke zvýšení tlaku páry a rovnoměrnějšímu vychlazení ve VT dílu. Regulační okruh R17 nám tedy zajišťuje, že nedojde k nedovolenému nárůstu teplotního rozdílu mezi horním a spodním tělesem VT dílu.

K tomuto řešení bylo možné přistoupit díky náhradě olejové regulace TG za elektronickou regulaci. Tato náhrada proběhla současně s modernizací sekundárního okruhu elektrárny. [13]

8 Zjednodušený výpočet výkonu parní turbíny

Výkon parní turbíny se obecně počítá podle vztahu:

$$P = M \times H_{is} \times \eta_c = M \times H$$

Turbína EDU se skládá z 1 VT a 2 NT dílů, mezi VT a NT je zapojen separátor páry a přehřívák. Proto je nutno TG počítat odděleně jako VT a NT část. Pára, která slouží pro regeneraci, je z turbíny odebírána za jednotlivými stupni, proto je možné pro zjednodušený výpočet použít jako hmotnostní průtok turbínou aritmetický průměr hmotnostního toku páry na vstupu a na výstupu turbíny.

Vnitřní výkon turbíny:

- střední hmotnostní průtok páry na VT dílu $M_{VT_{střední}} = 344,28 \text{ kg/s}$
- rozdíl entalpií před a za VT dílem $H_{VT} = 322,9 \text{ kJ/kg}$

$$P_{VT} = M_{VT_{střední}} \times H_{VT} = 344,28 \times 322,9 = 111,168 \text{ MW}$$

- střední hmotnostní průtok páry na NT dílech $M_{NT_{střední}} = 237,93 \text{ kg/s}$
- rozdíl entalpií před a za NT díly $H_{NT} = 609,3 \text{ kJ/kg}$

$$P_{NT} = M_{NT_{střední}} \times H_{NT} = 237,93 \times 609,3 = 144,970 \text{ MW}$$

Svorkový výkon je nutno snížit o mechanické ztráty a o ztráty generátoru:

- účinnost mechanická $\eta_m = 0,99$
- účinnost generátoru $\eta_{gen} = 0,985$ (vodíkem chlazený)

$$P = (P_{VT} + P_{NT}) \times \eta_m \times \eta_{gen} = (111,168 + 144,970) \times 0,99 \times 0,985 = 249,77 \text{ MW}$$

Oficiálně udávaný výkon turbíny EDU je 250 MW, což velmi přesně znázorňuje i tento do značné míry zjednodušený výpočet.

Aktuální výkon je ovlivněn mnoha okolními faktory, z nichž nezanedbatelnou složkou je počasí a s ním související teplota chladicí vody.

Hodnoty pro výpočet byly získány z interních materiálů společnosti ČEZ, a.s.. Byly použity jmenovité parametry bloku.

ZÁVĚR

V této práci jsem měl za cíl provést stručnou charakteristiku týkající se parních turbín a provést rozšířenou rešerši použití parních turbín. Při práci jsem používal odbornou literaturu uvedenou v seznamu použité literatury a interních materiálů společnosti ČEZ a.s.

Práce zmapovává postupný vývoj historie parních turbín a snaží se zachytit základní směry, kterými se vývoj turbín v jednotlivých obdobích ubíral. Dále práce ukazuje základní kritéria, podle kterých lze parní turbíny dělit, a uvádí vlastnosti uvedených koncepcí.

Důležitou částí práce je představení možností použití parních turbín v jednotlivých průmyslových odvětvích se zaměřením na použití v jaderných centrálách. Na tuto část navazuje popis turbíny v naší nejstarší jaderné elektrárně, která v letech 2009 až 2012 prošla rozsáhlou modernizací primárního a sekundárního okruhu. Je zde nastíněn i problém nerovnoměrného ochlazování VT dílu, který vznikl po modernizaci, a s nímž se v původním projektu nepočítalo.

V samotném závěru práce je zjednodušený výpočet výkonu parní turbíny nacházející se na jaderné elektrárně Dukovany. Výpočet nám ukazuje jak z parametrů a z množství páry, které protéká parní turbínou, lze snadno a přesně spočítat výkon parní turbíny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FIEDLER, Jan. Parní turbíny: návrh a výpočet. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 66 s. ISBN 80-214-2777-9.
- [2] KADRNOŽKA, Jaroslav. Tepelné turbíny a turbokompresory. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 308 s. ISBN 80-720-4346-3.
- [3] KRBEK, Jaroslav. Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1334-4.
- [4] PATURI, Felix R. Kronika techniky. 1. vyd. Praha: Fortuna Print, 1993, 651 s.
- [5] ŠKRANC, Karel. Aplikovaná termomechanika. 1. vyd. Brno: Čez, a. s. školící a výcvikové středisko Brno, 2004. 87 s.
- [6] KUBÍN, Miroslav. Proměny české energetiky: historie, osobnosti, vědecko-technický rozvoj. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2009, 615 s. ISBN 978-802-5445-242.
- [7] Steam turbine. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_turbine
- [8] JANOVSKEÝ, Julius. Parní stroje, parní turbíny, parní kotle [online]. Praha: I. L. Kober, 1904 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/stroje/pstroj1/pstroj1.htm>
- [9] LANDIS, Fred. Turbine: Steam turbines. In: Encyclopaedia Britannica [online]. 2012 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/609552/turbine/45677/Steam-turbines>
- [10] Jaderná energetika v České republice [online]. [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-v-cr.html>
- [11] Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET, kogenerace). Teplárenské sdružení České republiky [online]. [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/?id=0100#>
- [12] Jaderná elektrárna. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jaderná_elektrárna
- [13] Firemní zdroje ČEZ, a.s.

SEZNAM PUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
P	výkon parní turbíny	W
P_{VT}	výkon VT dílu	W
P_{NT}	výkon NT dílů	W
M	hmotnostní průtok	kg/s
$M_{VTstřední}$	střední hmotnostní průtok páry na VT dílu	kg/s
$M_{NTstřední}$	střední hmotnostní průtok páry na NT dílech	kg/s
H_{is}	entalpie izoentropického spádu na turbíně	J/kg
H	entalpie zpracovaná turbínou	J/kg
H_{VT}	rozdíl entalpii před a za VT dílem	J/kg
H_{NT}	rozdíl entalpii před a za NT díly	J/kg
η_c	celková účinnost turbíny	-
η_m	účinnost mechanická	-
η_{gen}	účinnost generátoru	-